土壤與環境，民國九十年九月，第四卷，第三期，第171頁至第182頁
Soil and Environ., September 2001, Vol. 4, No. 3, p171-p182.

以水萃取液與腐植物質中有機碳之測定建立堆肥腐熟化程度評估指數

Determination of Organic Carbon in Water Extract and Humic Substances to Establish Evaluation Indices for the Degree of Maturity of Compost

鄭智馨* 簡宣裕 李艷琪 張愛華
Chih-Hsing Cheng * Shiuan-Yuh Chien Yahn-Chir Lee Ai-Hwa Chang

ABSTRACT

Twenty-three compost samples consisting of plant residues, poultry manure, swine manure, and cattle manure were collected from Taiwan local compost plants. Total organic carbon (TOC) and oxidable carbon (OXC) in water extract and humic substances of compost were determined by elemental analysis and Walkley-Black method. Highly significant correlations were found between two methods for each individual group and total samples. Thus, the oxidable carbon could be accurately converted into total organic carbon by general equations TOC = 1.11 OXC, TOC = 1.05 OXC + 11.5, and TOC = 1.09 OXC in water extract, alkaline extract, and fulvic fractions, respectively. The results could be of great help in laboratories in which the element analysis is not available or in simple routine analytical determination. The information of evaluation indices including ratio of organic carbon to organic nitrogen in water extract (Cw/Nw-org), ratio of organic carbon in water extract to total organic nitrogen (Cw/Norg), ratio of organic carbon in humic acid to fulvic fraction (CHA/CFF), and humification index (HI) based on total organic carbon in water extract and humic substances were obtained. The Cw/Norg and CHA/CFF could effective cooperatively evaluate the degree of maturity, but the Cw/Nw-org and HI could not be suitable for evaluating the degree of maturity of various compost. Most Cw/Norg and CHA/CFF obtained by conversion of oxidable carbon could ably evaluate the degree of maturity of compost, excluding some poultry manure compost samples derived from CHA/CFF that could be mistaken to immature compost.

Key words : compost, water extract, humic substances, total organic carbon, oxidable carbon, degree of maturity, evaluation index

摘 要

採集台灣地區 23 家堆肥場之堆肥，包括植物殘渣堆肥、雞糞堆肥、豬糞堆肥與牛糞堆肥，分別以元素分析儀及 Walkley-Black 法測定堆肥水萃取液與腐植物質中全有機態碳含量 (TOC) 與氧化態碳含量 (OXC)。兩測定方法間有極顯著的相關，可將全部堆肥樣品分別使用 TOC = 1.11

農業委員會 農業試驗所 農業化學系。Department of Agricultural Chemistry, Taiwan Agriculture Research Institute, Council of Agriculture, Taichung, Taiwan 413, ROC.
* Corresponding Author, E-mail: chcheng@wufeng.tari.gov.tw

OXC、TOC = 1.05 OXC + 11.5 及 TOC = 1.09 OXC 等方程式，將堆肥水萃取液、鹼萃取液與黃酸型態的氧化態碳含量，轉換而得到全有機碳含量。這樣的結果對於沒有元素分析儀設備或常作例行性分析的實驗室而言，是十分有幫助的。根據堆肥樣品水萃取液與腐植物質全有機態碳含量等資料，可得到水萃取液有機碳含量與有機氮含量比值 (Cw/Nw-org)、水萃取液有機碳含量與固態型式全有機氮含量比值 (Cw/Norg)、腐植酸有機碳含量與黃酸型態有機碳含量比值 (CHA/CFF) 及腐質化指數 (humification index, HI) 等腐熟化程度評估指數。其中 Cw/Norg 與 CHA/CFF 兩評估指數可有效地共同評估堆肥腐熟化程度，而 Cw/Nw-org 與 HI 則較不適合用於評估不同來源堆肥之腐熟化程度。此外，根據氧化態碳含量轉換得到的 Cw/Norg 與 CHA/CFF 兩評估指數，除了部分雞糞堆肥樣品在 CHA/CFF 評估指數上，易造成將堆肥樣品評估成爲未腐熟堆肥外，大部份均能符合對堆肥腐熟化程度的區分。

關鍵詞：堆肥、水萃取液、腐植物質、全有機態碳、氧化態碳、腐熟化程度、評估指數

前 言

隨著有機廢棄物的增加，如何將其處理與再利用以減少環境污染，成了亟需迫切解決的問題。而將其經堆肥化後，作爲有機肥料、土壤改良劑或是栽培介質等使用，均爲可行的方法。有相當多的研究報告提出 (Inbar *et al*., 1993; Ayuso *et al*., 1995; Giusquiani *et al*., 1995)，堆肥的施用可增進作物生長與改善土壤性質。不過，當品質不良的堆肥施入土壤時，反而對土壤與作物產生負面的影響，其中最常發生的，就是施入未腐熟的堆肥所造成的危害。

堆肥化過程係微生物的生化反應，由於大部分生化反應發生於堆肥水溶液相中，因此，許多學者提出可藉由分析堆肥水萃取液的性質，用以評估堆肥的腐熟化程度 (Chanyasak *et al*., 1980; Chanyasak and Kubota, 1981; Garcia *et al*., 1991)。Chanyasak and Kubota (1981) 提出腐熟化堆肥水萃取液中有機碳含量與有機氮含量的比值，應介於 5 至 6 間；Hue and Liu (1995) 提出以堆肥水萃取液中有機碳含量除以堆肥固態型式全有機氮含量，當比值小於 0.7 時，可爲腐熟化堆肥。此外，堆肥化過程中，腐植物質 (humic substances) 的性質會隨著堆肥化過程而改變，分析腐植物質的特性，也常被使用於評估堆肥的腐熟化程度 (Chen *et al*., 1977; Roletto *et al*., 1985; Iglesias-Jimenez and Garcia, 1992; Chefetz *et al*., 1998)。腐植物質中較常被測定的項目有鹼萃取液 (alkaline extrat) 有機碳含量 (Cext)、腐植質酸 (humic acid) 有機碳含量 (CHA) 與黃酸型態 (fulvic fraction) 有機碳含量 (CFF) 等。其中，黃酸型態有機碳含量常隨著腐熟化程度而減少，部分轉換成腐植質酸有機碳，部分則被微生物分解；而腐植質酸有機碳含量則隨腐熟化程度而增加 (Inbar *et al*., 1990; Chefetz *et al*., 1996)。

因此，堆肥水萃取液與堆肥腐質物質中有機碳含量測定，爲評估堆肥腐熟化程度的重要項目。有機碳含量的測定方法，有乾燒法 (dry combustion) 與濕氧化法 (wet oxidation) 兩種。液態型式的有機碳測定，一般先將液態樣品經冷凍乾燥 (Schnitzer, 1982) 或以惰性吸附劑 (inert absorbent) 吸附後 (Sanchez-Monedero *et al*., 1996)，再以乾燒法測定有機碳含量。此種測定方法可得到正確之全有機態碳 (total organic carbon, TOC)，不過其分析成本昂貴，操作複雜且費時，相當不適合作經常性分析試驗。濕

氧化測定方法，則提供了簡單、快速且便宜的有機碳測定方式，Walkley-Black 法 (Walkley and Black, 1934) 爲濕氧化測定法中最廣泛使用的測定方式。Walkley-Black 法之測定值僅得到氧化態碳 (oxidable carbon, OXC)，並非全有機態碳，但由於氧化態碳與全有機態碳間有相當高的相關性，故仍可藉由轉換係數或轉換方程式將氧化態碳轉換成全有機態碳。關於固態型式全有機態碳與氧化態碳的相關性，已有許多學者針對土壤、有機廢棄物或堆肥等，提出其相關性 (Amacher *et al.*, 1986; Grewal *et al.*, 1991; Navarro *et al.*, 1993; 鄭智馨等人，2000)。然而液態型式的全有機態碳與氧化態碳的相關性，僅有少數學者曾提出相關報告 (Ciavatta *et al.*, 1991; Sanchez-Monedero *et al.*, 1996)，且其中並沒有以堆肥水萃取液或腐植物質有機碳含量當作試驗材料之研究。

本研究之目的爲 (1) 建立堆肥樣品水萃取液與腐植物質中全有機態碳含量與氧化態碳含量的相關性，提供以較爲簡單、快速而且便宜的 Walkley-Black 分析方法，而準確得到其全有機碳含量。(2) 根據堆肥樣品水萃取液與腐植物質全有機態碳含量資料，建立堆肥腐熟化程度之評估指標，並比較以全有機態碳含量與經氧化態碳含量轉換所建立之評估指數間關係。

材料與方法

堆肥樣品採樣

共採集台灣地區 23 家堆肥場現址中的堆肥成品爲主。樣品經 55℃ 通氣烘乾，磨碎至通過 0.25 mm 篩孔後，加以儲存備用。堆肥樣品一般特性分析，固態型式全有機態碳與全氮含量以元素分析儀測定。有機物質爲堆肥樣品經 550℃ 灰化 4 小時後，損失之重量。pH 值與 EC 值以去離子水 (1 : 10 w/v) 萃取堆肥，1 小時後測定。堆肥水萃取液中全氮含量之測定，分析條件如水萃取液中全有機態碳測定方式，以元素分析儀測定，而水萃取液無機態氮含量以蒸餾法測定 (Keeney and Nelson, 1982)，水萃取液中有機態氮含量爲全氮含量與無機態氮含量之差值。

根據堆肥材料的不同，將堆肥區分成植物殘渣堆肥 (plant residues, PR)、雞糞堆肥 (poultry manure, PM)、豬糞堆肥 (swine manure, SM) 與牛糞堆肥 (cattle manure, CM) 四組。植物殘渣堆肥中 PR1、PR3、PR4、PR5 及 PR7 之主要原料爲菇類栽培後之廢棄木屑以及豆粕類爲主，PR1、PR4、PR5 及 PR7 堆肥的原料，另分別含有花生殼、酒廠廢渣、菸葉與菸桿屑及毛豆桿，PR2 樣品的原料爲多種豆粕類混合，PR6 堆肥的原料爲濃縮醣蜜發酵廢液與蔗渣；PR8 與 PR9 堆肥的原料爲樹皮堆肥。PM1、PM3 及 PM6 堆肥的主要原料以蛋雞糞加上菇類栽培後之廢棄木屑爲主，PM2、PM4 及 PM5 堆肥的原料主要以蛋雞或肉雞糞加上菇類栽培後之廢棄木屑爲主。SM1、SM2、SM3 及 SM4 堆肥的原料爲豬糞與菇類栽培後之廢棄木屑爲主，SM5 與 SM6 堆肥的原料爲豬糞與蔗渣。CM1 樣品爲純牛糞堆肥，CM2 堆肥原料爲牛糞與蔗渣。

堆肥水萃取液及腐植物質萃取操作步驟

堆肥水萃取步驟依據 Chanyasak and Kubota (1981) 萃取方法，秤取 4 g 堆肥，加入 30 mL 去離子水，置於 60℃ 水浴中 30 分鐘，再利用高速離心機以 10,000 g 離心 15 分鐘後，以 0.45 μm 濾紙過濾，濾液即爲堆肥的水萃取液。

堆肥腐植物質以 0.1 M NaOH 溶液 1 : 20 (w/v) 重量對萃取液體積比萃取，經充氮氣

振盪 24 小時後，以高速離心機 10,000 g 離心 15 分鐘，將離心後之上層溶液分成兩部分，一部份爲鹼萃取溶液，另一部份則以濃硫酸調至 pH 2，靜置 24 小時後，以上述之相同條件離心。經離心後之上層溶液部分爲黃酸型態，沉澱部分爲腐植酸。測定鹼萃取溶液及黃酸型態溶液有機碳含量，兩者之差值爲腐植酸有機碳含量。

氧化態碳測定

以 Walkley-Black 法測定堆肥樣品水萃取液與腐植物質之氧化態碳含量。取 2～10 mL 溶液於 500 mL 三角瓶中，加入 20 mL 1 N $K_2Cr_2O_7$ 與 40 mL 濃硫酸，迅速振盪混合 30 秒，30 分鐘後加入 200 mL 的去離子水，未被還原之 $K_2Cr_2O_7$ 以 0.5 N $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 滴定。空白試驗以相同方式加入等量的 $K_2Cr_2O_7$ 與濃硫酸進行。滴定指示劑使用 2 mM o-phenanthroline-ferrous complex (Ferroin) 試劑。Walkley-Black 法測定氧化態碳含量計算式如下

$$\% \ OXC_{萃取溶液} = (meq\ K_2Cr_2O_7 - meq\ FeSO_4)(0.3)/W$$

其中 W 爲分析之堆肥水萃取液或腐植物質溶液重。

全有機態碳測定

全有機態碳測定以元素分析儀 (Carlo Erba instruments, EA 1108) 進行 (Sanchez-Monedeno *et al.*, 1996)。於錫囊中先加入約 6 mg 的溶液吸附物質 (Chromosorb W P/N 338 37530, Carlo Erba instruments)，歸零後精秤堆肥水萃取液或腐植物質溶液 40～100 mg (0.001 mg 準確度 (accuracy)) 至錫囊 (tin capsule) 內。對於含有碳酸鹽類的堆肥樣品則同時加入 10 μL 鹽酸 (濃度 1 : 10 v/v) 去除碳酸鹽。將錫囊置於 45℃ 烘箱，經 24 小時烘乾後，封閉錫囊，以元素分析儀測定全有機態碳含量。本研究氧化態碳與全有機態碳測定，均以三重複測定。

元素分析儀的設定條件以 BBOT (2-5-Bis-(5-tert.-butyl-benzoxazol-2-yl)-thiophen) 當標準樣品，樣品反應溫度爲 1020℃，銅線還原反應溫度爲 600℃，氣相層析分離管柱溫度爲 60℃，CO_2 測定以電導偵測器定量。每分析 10 個樣品，再以標準樣品校正，每個樣品分析時間爲 750 秒。

結果與討論

堆肥樣品特性

供試堆肥樣品之一般特性分析結果，可參閱鄭智馨等人 (2000) 之報告。全有機態碳含量分佈除 SM5 外，其餘樣品均介於 20.71～47.50%；有機質含量同樣除 SM5 外，介於 38.17～90.89% 之間，其中，有機物質的 52% 爲全有機態碳。SM5 樣品係由於混入的蔗渣材料在堆放過程中曾發生火災，造成堆肥化後有機物質偏低的結果。

堆肥樣品之碳氮比除 PR8 與 PR9 較高 (分別爲 42.27 與 24.45) 外，其餘堆肥樣品之碳氮比皆小於 20 以下。由於 PR8 與 PR9 之原料係來自樹皮堆肥，使得經堆肥化後之堆肥樣品，仍會有較高之碳氮比 (N'Dayegamiye and Isfan, 1991)。一般認爲當碳氮比小於 20 之堆肥樣品，可視爲腐熟堆肥，不過 Morel *et al* (1985) 建議若堆肥原料含有較高濃度的氮時，其碳氮比小於 20，僅能作爲評估腐熟堆肥的必要條件，而不能作爲判斷堆肥腐熟的絕對條件，必須再加上其它性質加以評估。

堆肥樣品的 pH 值介於 5.31 至 9.26 間，其中部分植物殘渣堆肥之 pH 值較低，這可能係受到植物殘渣中有機酸的影響，但部

分較高 pH 值的堆肥，則可能來自石灰或蚵殼粉的添加 (鄭智馨等人，2000)。Wilson *et al.* (1980) 曾提出適當堆肥 pH 值應介於 5.5 至 8.0 之間，但若是堆肥 pH 值在 5 或 11 左右時，則僅會在最初的 1 至 2 天，阻礙微生物活性。

堆肥水萃取液與腐植物質之有機碳含量

堆肥水萃取液與腐植物質各型態全有機態碳含量與氧化態碳含量如表一，由表中顯示其含量隨著堆肥樣品原料來源不同而差異甚大。水萃取液全有機態碳含量、鹼萃取全有機碳態含量、黃酸型態全有機態碳含量及腐植酸全有機態碳含量分佈範圍分別介於 2.4～73.4 g kg^{-1}、35.8～261.1 g kg^{-1}、9.0～107.6 g kg^{-1} 及 11.2～159.0 g kg^{-1} 間，對各型態全有機態碳含量佔固態型式全有機碳含量之比例，分別介於 7.0～21.0 %、11.3～55.1%、3.6～21.6% 及 3.1～33.5 %間。

以 Walkley-Black 法得到的氧化態碳含量，小於以元素分析儀得到的全有機態碳含量。氧化態碳含量與全有機態碳含量間線性迴歸方程式之建立，分別以分組堆肥樣品與全部堆肥樣品兩種方式計算 (表二)。在水萃取液中，所有方程式均呈統計上極顯著相關 ($P<0.001$)，而且截距值與零之間並無顯著性差異 ($P>0.05$)。因此，可簡單的以斜率轉換氧化態碳含量，而得到全有機態碳含量。以全部堆肥樣品爲例，可將氧化態碳含量乘以 1.11，轉換而得到堆肥水萃取液的全有機態碳含量。

在鹼萃取液與黃酸型態之氧化態碳與全有機態碳含量的線性迴歸方程式中，所有方程式同樣均呈統計上極顯著相關 ($P<0.001$) (表二)。鹼萃取液之植物殘渣堆肥樣品與全部堆肥樣品以及黃酸型態之豬糞堆肥樣品所建立之線性迴歸方程式，其截距值與零間呈顯著差異 ($P<0.01$)，使得這些堆肥樣品迴歸方程式之截距值不可被忽略，必須以迴歸方程式轉換氧化態碳含量與全有機態碳含量間的相關性。其餘堆肥樣品之資料則可簡單的以斜率值，作爲氧化態碳含量與全有機態碳含量的轉換係數。

Sanchez-Monedero *et al.* (1996) 曾以泥炭土、下水道汙泥、禽畜糞、堆肥與城市固體廢棄物等不同有機廢棄物爲材料，提出鹼萃取液與黃酸型態溶液中，氧化態碳與全有機態碳含量間的轉換，可以式 (1) 及式 (2) 表示。

$$TOC = 1.22\,OXC \qquad (1)$$

$$TOC = 1.69\,OXC - 0.43 \qquad (2)$$

若將本試驗的堆肥樣品帶入上述方程式中，以鹼萃取液氧化態碳含量所得到之轉換值與實際堆肥樣品全有機態碳含量比較，兩者並無顯著性差異 ($P=0.25$)，不過黃酸型態的轉換值與實際堆肥樣品全有機態碳含量間，則呈顯著性差異 ($P<0.05$)。經堆肥化後的樣品與其它有機廢棄物間，所得到氧化態碳與全有機態碳間的轉換係數，在部分型態上並不相同。因此，對堆肥樣品而言，表二所建立之轉換方程式是十分有用的，因爲可不必經由昂貴且耗時的元素分析儀，而僅使用簡單、快速且便宜的 Walkley-Black 法測定方式，而準確得到堆肥樣品水萃取液與腐質物質中的全有機態碳含量。

以堆肥樣品水萃取液與腐植物質全有機態碳含量建立之堆肥腐熟化評估指數

表三表示根據堆肥樣品水萃取液與腐植物質全有機態碳含量等數據，所建立評估堆肥腐熟化程度之相關資料。一般常被使用評估堆肥腐熟化程度的評估指數有水

Table 1. Values of total organic carbon (TOC) and oxidabe carbon (OXC) in the water extract (Cw), alkaline extract (Cext), fulvic fractions (CFF), and humic acid (CHA) of the compost (g kg^{-1}, dm).

Compost	Cw		Cext		CFF		CHA	
No.	TOC	OXC	TOC	OXC	TOC	OXC	TOC	OXC
PR1	45.5	33.4	76.9	69.3	65.7	62.0	11.2	7.3
	(12.6)†	(9.3)	(21.4)	(19.3)	(18.3)	(17.3)	(3.1)	(2.0)
PR2	61.7	53.3	261.6	239.3	102.6	99.0	159.0	140.3
	(13.0)	(11.2)	(55.1)	(50.4)	(21.6)	(20.8)	(33.5)	(29.5)
PR3	11.1	7.1	43.8	99.9	14.7	54.7	29.2	19.1
	(3.3)	(2.2)	(13.2)	(9.9)	(4.4)	(4.1)	(8.8)	(5.8)
PR4	38.9	29.8	121.4	32.7	61.2	13.5	60.2	45.3
	(9.4)	(7.2)	(29.3)	(24.1)	(14.8)	(13.2)	(14.5)	(10.9)
PR5	73.4	70.1	145.2	133.3	107.6	89.4	37.6	43.9
	(16.9)	(16.1)	(33.4)	(30.6)	(24.7)	(20.6)	(8.7)	(10.1)
PR6	13.0	11.3	107.1	93.9	17.1	20.5	89.9	73.4
	(3.9)	(3.4)	(32.3)	(28.3)	(5.2)	(6.2)	(27.1)	(22.1)
PR7	17.3	14.3	83.2	66.3	32.7	25.1	50.5	41.1
	(5.5)	(4.5)	(26.2)	(20.9)	(10.3)	(7.9)	(15.9)	(13.0)
PR8	3.2	2.3	50.9	41.9	16.5	13.5	34.5	28.5
	(0.7)	(0.5)	(11.3)	(9.3)	(3.6)	(3.0)	(7.6)	(6.3)
PR9	4.1	3.5	62.9	44.3	14.2	11.4	48.7	32.9
	(1.2)	(1.0)	(18.4)	(12.9)	(4.1)	(3.3)	(14.2)	(9.6)
PM1	20.2	18.3	44.2	40.1	23.1	20.2	21.1	20.0
	(9.6)	(8.7)	(21.1)	(19.1)	(11.0)	(9.6)	(10.0)	(9.5)
PM2	37.6	36.2	74.2	61.8	35.7	31.5	38.5	30.2
	(13.7)	(13.2)	(27.1)	(22.6)	(13.0)	(11.5)	(14.0)	(11.0)
PM3	33.7	29.5	54.0	43.2	23.9	22.0	30.1	21.2
	(16.3)	(14.2)	(26.1)	(20.8)	(11.6)	(10.6)	(14.5)	(10.2)
PM4	17.1	14.3	50.2	33.3	30.3	17.1	29.9	16.2
	(5.3)	(4.4)	(15.5)	(10.3)	(6.3)	(5.3)	(9.2)	(5.0)
PM5	56.8	48.2	91.7	74.6	48.2	33.8	43.5	40.7
	(21.1)	(17.9)	(34.0)	(27.7)	(17.9)	(12.6)	(16.1)	(15.1)
PM6	53.9	44.7	87.0	71.3	42.5	38.5	44.5	32.7
	(17.9)	(14.9)	(28.9)	(23.7)	(14.1)	(12.8)	(14.8)	(10.9)
SM1	16.7	15.8	51.2	43.2	25.0	21.9	26.3	21.4
	(4.8)	(4.5)	(14.6)	(12.3)	(7.1)	(6.2)	(7.5)	(6.1)
SM2	21.9	18.1	100.9	71.5	28.6	26.6	72.3	44.9
	(5.8)	(4.8)	(26.7)	(18.9)	(7.6)	(7.0)	(19.1)	(11.9)
SM3	21.4	18.2	88.3	65.8	32.9	28.5	55.4	37.3
	(5.8)	(5.0)	(24.1)	(17.9)	(9.0)	(7.7)	(15.1)	(10.2)
SM4	28.0	22.3	99.3	76.7	25.5	21.2	73.8	55.4
	(7.7)	(6.1)	(27.1)	(20.9)	(7.0)	(5.8)	(20.1)	(15.1)
SM5	2.4	1.2	35.8	20.8	9.0	6.2	26.7	14.6
	(2.9)	(1.4)	(42.6)	(24.8)	(10.8)	(7.4)	(31.9)	(17.4)
SM6	12.7	9.8	56.3	46.3	16.5	12.0	39.8	34.3
	(6.1)	(4.7)	(27.0)	(22.2)	(7.9)	(5.8)	(19.1)	(16.4)
CM1	21.1	17.0	72.3	56.0	17.7	16.5	54.6	39.5
	(8.5)	(6.8)	(29.0)	(22.4)	(7.1)	(6.6)	(21.9)	(15.8)
CM2	6.7	5.7	55.0	43.5	9.2	10.9	45.6	32.6
	(3.9)	(3.3)	(31.7)	(25.1)	(5.3)	(6.3)	(26.5)	(18.8)

†Figures in parentheses indicate the percentage of total organic carbon in solid phase.

土壤與環境・民國九十年九月・第四卷・第三期・第171頁至第182頁
Soil and Environ., September 2001, Vol. 4, No. 3, p171-p182.

Table 2. Correlations between total organic carbon (TOC) and oxidable carbon (OXC) in water extract (Cw), alkaline extract (Cext), and fulvic fractions (CFF) obtained for each individual group and total samples.

Groups of compost	Equation	r^2	n
	Water extract (Cw)		
Plant residues (PR)	$TOC = 1.08^{***}\ OXC + 2.71^{ns}$	0.982^{***}	9
Poultry manure (PM)	$TOC = 1.19^{***}\ OXC - 1.32^{ns}$	0.983^{***}	6
Swine manure (SM)	$TOC = 1.16^{***}\ OXC + 0.70^{ns}$	0.977^{***}	6
Total samples	$TOC = 1.11^{***}\ OXC + 1.64^{ns}$	0.983^{***}	23
	Alkaline extract (Cext)		
Plant residues (PR)	$TOC = 1.04^{***}\ OXC + 10.6^{**}$	0.995^{***}	9
Poultry manure (PM)	$TOC = 1.13^{***}\ OXC + 6.01^{ns}$	0.951^{***}	6
Swine manure (SM)	$TOC = 1.28^{***}\ OXC + 2.72^{ns}$	0.956^{***}	6
Total samples	$TOC = 1.05^{***}\ OXC + 11.5^{***}$	0.986^{***}	23
	Fulvic fractions (CFF)		
Plant residues (PR)	$TOC = 1.08^{***}\ OXC + 2.10^{ns}$	0.987^{***}	9
Poultry manure (PM)	$TOC = 1.26^{***}\ OXC - 1.91^{ns}$	0.878^{***}	6
Swine manure (SM)	$TOC = 1.00^{***}\ OXC + 3.55^{**}$	0.985^{***}	6
Total samples	$TOC = 1.09^{***}\ OXC + 1.53^{ns}$	0.982^{***}	23

***, ** Significant at $P < 0.001$ and 0.01, respectively.
ns : Not significant.
n : Number of samples.

萃取液有機碳含量與有機氮含量比值(Cw/Nw-org)、水萃取液有機碳含量與固態型式全有機氮比值(Cw/Norg)、腐植酸有機碳含量與黃酸型態有機碳含量比值(CHA/CFF)及腐質化指數(humification index, HI)等。其中，HI爲堆肥樣品腐植酸有機碳含量除以全有機碳含量之百分比(Roletto *et al.*, 1985)。

供試堆肥樣品之Cw/Nw-org比值分佈範圍介於5.2至14.5間，大部分堆肥樣品的比值均高於Chanyasak and Kubota (1981)所定義腐熟堆肥Cw/Nw-org比值介於5～6的標準。這樣的結果也發生於Erhart and Burian (1997)與Forster *et al.* (1993)的研究報告，其Cw/Nw-org比值範圍分別介於5.07～8.61與2.3～32.3間，而當中較高的比值來自於以樹皮或修剪樹木(yard trimmings)等木質材料所製成的堆肥樣品。由於供試堆肥樣品，混入了以木屑爲材料的菇類栽培後之廢棄介質，這可能導致Cw/Nw-org比值偏高，而與前人定義腐熟堆肥的比值有所差異。

Cw/Norg比值分佈範圍介於0.5至2.2間。依據Hue and Liu (1995)與Bernal *et al.* (1998)對市售堆肥及不同來源有機廢棄物堆肥所作的建議，腐熟堆肥的Cw/Norg比值應小於0.7以下。若加上以Hue and Liu (1995)提供的半發酵堆肥樣品的比值1.1作爲評估值時，本研究的堆肥樣品有9個樣品的Cw/Norg比值小於0.7，但也有8個樣品的Cw/Norg比值大於1.1，不符合以Cw/Norg所定義的腐熟化堆肥評估標準。

CHA/CFF比值分佈範圍在0.2至5.4間，根據Iglesias-Jimerez and Garcia (1992)

Table 3. Characterizations of evaluation indices for the degree of maturity based on total organic carbon in water extract and humic substances of compost.

Compost No.	Nw-total g kg^{-1}	Nw-org g kg^{-1}	Cw/Nw-org	Cw/Norg	CHA/CFF	HI %
PR1	6.5	6.3	7.2	1.6	0.2	3.1
PR2	12.7	11.9	5.2	0.9	1.6	33.5
PR3	4.3	1.4	8.0	0.5	2.0	8.8
PR4	4.5	2.9	13.3	1.3	0.9	14.5
PR5	6.9	5.1	14.5	2.4	0.4	8.7
PR6	1.6	1.3	9.7	0.6	5.4	26.1
PR7	3.9	3.0	5.8	0.5	1.7	15.9
PR8	0.3	0.3	11.3	0.3	2.1	7.6
PR9	0.4	0.4	10.8	0.3	3.4	14.2
PM1	2.8	2.7	7.6	1.2	0.9	10.0
PM2	6.7	6.1	6.2	1.7	1.1	14.0
PM3	5.5	5.4	6.2	1.5	1.3	14.5
PM4	2.6	1.5	11.7	1.0	1.5	9.2
PM5	10.4	8.9	6.4	1.9	0.9	16.1
PM6	7.5	6.4	8.4	2.2	1.2	14.8
SM1	2.6	1.5	10.8	0.9	1.1	7.5
SM2	3.0	2.6	8.4	0.7	2.6	19.1
SM3	3.1	2.0	10.9	1.1	1.7	15.1
SM4	6.4	3.9	7.1	0.8	3.1	20.1
SM5	1.9	0.2	11.2	0.3	2.7	31.9
SM6	2.0	1.8	7.2	0.7	2.6	19.1
CM1	2.5	2.3	9.3	1.1	3.2	21.9
CM2	1.2	0.9	7.5	0.5	5.3	26.5

以城市固體廢棄物堆肥爲材料，提出CHA/CFF比值應大於1.6；Roletto *et al.* (1985)建議CHA/CFF比值大於1.0時，則可判斷爲腐熟堆肥；也有許多報告 (Ouatmane *et al.*, 2000; Das, 1988; Inbar *et al.*, 1990; Forster *et al.*, 1993)指出，在不同堆肥材料所製成之腐熟堆肥，CHA/CFF的比值常介於1.1至1.7之間。以本研究的堆肥樣品而言，CHA/CFF比值小於1.1有5個樣品，小於1.3有8個樣品，因此，部分堆肥樣品在CHA/CFF比值評估指數上，並不符合腐熟化堆肥標準。

HI值分佈範圍介於3.1%至33.5%間，根據Iglesias-Jimerez and Garcia (1992)定義城市固體廢棄物腐熟堆肥的HI值應在13%以上；Rolento *et al.* (1985)則定義HI值在3.5%以上，即爲腐熟堆肥；而Ouatmane *et al.* (2000)、Bernal *et al.* (1998)與Forster *et al.* (1993)的報告則指出，其HI值常隨堆肥材料的不同而有很大的差異，例如可從木屑堆肥的3.4至下水道污泥與棉花廢棄物混合堆肥的22.2。因此，Bernal *et al.* (1998)建議當堆肥樣品來自不同的堆積材料時，單以HI值大小來判斷不同材料間的腐熟化程度並不適合。

腐熟化程度評估指數之相關特性

表四爲 Cw/Nw-org、Cw/Norg、CHA/CFF 及 HI 等評估堆肥腐熟化程度評估指數間的相關係數。其中，Cw/Nw-org 比值由於會隨堆肥材料來源不同而有差異，因此與其它指數間並無顯著相關。HI 值同樣隨著不同堆肥材料而有差異，除了與較類似來源之 CHA/CFF 比值有顯著相關外，與其它評估指數則無相關。Cw/Norg 與 CHA/CFF 兩評估指數呈顯著相關，顯示此兩項評估指數可共同用於評估堆肥腐熟化程度。

表五列出在 Cw/Norg 及 CHA/CFA 兩評估指數，在不同數值的區分下，共同用於評估堆肥腐熟化程度。在 Cw/Norg 小於 1.1 以下的堆肥樣品中，除 SM1 的 CHA/CFF 爲 1.1 外，其餘 14 個堆肥樣品的 CHA/CFF 均大於 1.3 以上，其平均值爲 2.7；Cw/Norg 值大於 1.1 以上的堆肥樣品中，除 PM3 的 CHA/CFF 爲 1.3 及 PM6 爲 1.2 外，其餘堆肥樣品的 CHA/CFF 均小於 1.3，其平均值爲 0.9。而 CHA/CFF 大於 1.3 的堆肥樣品中，除 PM3 的 Cw/Norg 爲 1.5 外，其餘 Cw/Norg 均小於 1.1 以下，其平均值爲 0.7；CHA/CFF 小於 1.3 以下樣品中，則除 SM1 爲 0.9 外，其餘 Cw/Norg 均大於 1.1，其平均值爲 1.6。

Table 4. Correlation matrix between evaluation indices for the degree of maturity based on total organic carbon in water extract and humic substances of compost.

	Cw/Nw-org	Cw/Norg	CHA/CFF	HI
Cw/Nw-org	1	ns	ns	ns
Cw/Norg		1	-0.63**	ns
CHA/CFF			1	0.60**
HI				1

** significant at $P < 0.01$.
ns: Not significant.

Table 5. Number of compost samples differentiated by different values of evaluation indices in Cw/Norg and CHA/CFF.

Number of compost Samples		Cw/Norg ≦0.7	>0.7 & ≦1.1	>1.1
CHA/	≦1.1	0	0	6
CFF	>1.1 & ≦1.3	0	1	1
	>1.3	10	4	1

除了少數堆肥樣品 (SM1、PM3 與 PM6) 出現相互矛盾的判斷結果外，其餘樣品均能符合兩者的區分標準，因此，以 Cw/Norg 及 CHA/CFF 兩評估指數，可有效地共同應用在評估堆肥樣品腐熟化程度。部分供試堆肥樣品中，根據兩者評估標準，可能是來自於尚未完全腐熟的堆肥，不過，這樣的結果仍需其它的評估因子，加以綜合討論，方能對堆肥樣品之腐熟與否，提供更正確的資料。

比較以全有機態碳與經氧化態碳轉換所建立評估指數之關係

表六表示以 Walkley-Black 方法測得之氧化態碳含量，經轉換成全有機碳含量後，所得到之 Cw/Norg 與 CHA/CFF 評估指數數值，其轉換方式分成以全部堆肥樣品所建立的迴歸方程式轉換與以分組堆肥樣品所建立的迴歸方程式轉換兩種。比較轉換後得到的數值與原本以全有機態碳含量所建立的數值間，兩者在統計上並無顯著性差異 ($P>0.05$)，且大部分堆肥樣品得到的數值，符合以全有機態碳含量所建立堆肥腐熟化程度之區分標準。但其中差異較大的堆肥樣品，發生於雞糞堆肥的 CHA/CFF 評估指數中，以分組堆肥樣品所建立之轉換數值，部分數值比以全有機態碳含量建立之數值低，甚至易造成將該組堆肥樣品錯誤評估成爲未腐熟堆肥。而以

Table 6. Values of Cw/Norg and CHA/CFF obtained by conversion of oxidable carbon in water extract and humic substances of compost.

Compost No.	Cw/Norg†	Cw/Norg‡	CHA/CFF†	CHA/CFF‡
PR1	1.2	1.2	0.2	0.2
PR2	0.9	0.8	1.4	1.4
PR3	0.3	0.3	2.1	2.0
PR4	1.1	1.0	1.0	0.9
PR5	2.4	2.4	0.6	0.5
PR6	0.6	0.6	4.9	4.9
PR7	0.5	0.4	2.0	1.9
PR8	0.2	0.2	2.8	2.7
PR9	0.3	0.3	3.7	3.6
PM1	1.2	1.3	1.4	0.8
PM2	1.7	1.8	1.2	0.8
PM3	1.4	1.5	1.4	0.8
PM4	0.8	0.9	1.5	0.7
PM5	1.7	1.8	1.4	1.0
PM6	2.0	2.1	1.1	0.7
SM1	0.8	0.9	1.4	1.2
SM2	0.7	0.7	2.0	2.0
SM3	0.9	1.0	1.6	1.6
SM4	0.6	0.7	3.0	3.0
SM5	0.1	0.1	3.9	1.7
SM6	0.6	0.6	3.6	2.8
CM1	0.9	0.9	2.9	2.9
CM2	0.5	0.5	3.8	3.8

† Converted by regressive equation of total compost samples.

‡ Converted by regressive equation of each individual group compost samples.

全部堆肥樣品所建立之轉換數值，部分呈現較高的數值，但比較評估堆肥腐熟與否之區分標準時，兩者的評估差異則較小。

結　論

藉由所建立之轉換方程式，可將全部堆肥樣品分別使用 TOC = 1.11 OXC、TOC = 1.05 OXC + 11.5 及 TOC = 1.09 OXC 等方程式，將堆肥水萃取液、鹼萃取液及黃酸型態的氧化態碳含量，轉換而得到全有機態碳含量。這樣的結果對沒有元素分析儀設備或常作堆肥例行性分析的實驗室十分有幫助的，因爲可不必經由分析昂貴的元素分析儀，僅使用簡單、快速且便宜的 Walkley-Black 法測定方式，即可準確得到堆肥樣品水萃取液與腐質物質中的全有機態碳含量。依據堆肥樣品水萃取液與腐植物質全有機態碳含量所建立之評估堆肥腐熟化度相關資料，以 Cw/Norg 與 CHA/CFF 兩評估指數可有效地共同評估堆肥之腐熟化程度；而 Cw/Nw-org 與 HI 則較不適合用於評估不同來源堆肥之腐熟化程度。此外，根據氧化態碳含量轉換得到的 Cw/Norg 與 CHA/CFF 兩評估指數，除了部分雞糞堆肥樣品在 CHA/CFF 評估指數上，易造成將堆肥樣品評估成爲未腐熟堆肥外，大部份均能符合對堆肥腐熟化程度的區分。

誌　謝

本論文感謝農業試驗所劉禎祺先生及兩位審查委員寶貴的指正與意見提供。

參考文獻

鄭智馨、簡宣裕、李艷琪、張愛華。2000。堆肥中全有機態碳、氧化態碳與有機物質間之關係。土壤與環境。3:345-352。

Amacher, M.C., R.E. Henderson, R.H. Brupbacher, and J.E. Sedberry Jr. 1986. Dichromate-oxidizable and total organic carbon contents of representative soils of the major soil areas of Louisiana. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 17:1019-1032.

Ayuso, M., J.A. Pascual, C. Garcia, and T. Hernandez. 1995. Evaluation of urban

wastes for agricultural use. Soil Sci. Plant Nutr. 42:105-111.

Bernal, M.P., C. Paredes, M.A. Sanchez-Monedero, and J. Cegarra. 1998. Maturity and stability parameters of composts prepared with wide range of organic wastes. Biores. Technol. 63:91-99.

Chanyasak, V., and H. Kubota. 1981. Carbon/organic nitrogen ratio in water extracts as measure of composting degradation. J. Ferment. Technol. 59:215-219.

Chanyasak, V., T. Yoshida, and H. Kubota. 1980. Chemical components in gel chromatographic fractionation of water extract from sewage sludge compost. J. Ferment. Technol. 58:533-539.

Chen, Y., N. Senesi, and M. Schnitzer. 1977. Information provided on humic substances by E4/E6 ratios. Soil Sci. Soc. Am. J. 41:352-358.

Chefetz, B., F. Adani, P. Genevini, F. Tambone, Y. Hadar, and Y. Chen. 1998. Humic-acid transformation during composting of municipal solid waste. J. Environ. Qual. 27:797-800.

Chefetz, B., P.G. Hatcher, Y. Hadar, and Y. Chen. 1996. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste. J. Environ. Qual. 25:776-785.

Ciavatta, C., M. Govi, L.V. Antisari, and P. Sequi. 1991. Determination of organic carbon in aqueous extracts of soils and fertilizers. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 22:1467-1476.

Das, A. 1988. City garbage compost as a source of humus. Biolog. Wastes 26:65-69.

Erhart, E., and K. Burian. 1997. Evaluating quality and supressiveness of Austrian biowaste composts. Compost Sci. Utilization 5(3):15-24.

Forster, J.C., W. Zech, and E. Wurdinger. 1993. Comparison of chemical and microbiological methods for the characterization of the maturity of composts from contrasting sources. Biol. Fertil. Soils 16:93-99.

Garcia, C., T. Hernandez, and F. Costa. 1991. Study on water extract of sewage sludge composts. Soil Sci. Plant Nutr. 37:399-401.

Giusqiuani, P.L., M. Pagliai, G. Gigliotti, D. Businelli, and A. Benetti. 1995. Urban waste compost: effects on physical, chemical, and biochemical soil properties. J. Environ. Qual. 24:175-182.

Grewal, K.S., G.D. Buchan, and R.R. Sherlock. 1991. A comparison of three methods of organic carbon determination in some New Zealand soils. J. Soil Sci. 42:251-257.

Hue, N.V. and J. Liu. 1995. Predicting compost stability. Compost Sci. Utilization 3(2):8-15.

Iglesias-Jimenez E., and P. Garcia. 1992. Determination of maturity indices for city refuse composts. Agric. Ecosyst. Environ. 38:331-343.

Inbar, Y., Y. Chen, and Y. Hadar. 1990. Humic substances formed during the composting of organic matter. Soil Sci. Soc. Am. J. 54:1316-1323.

Inbar, Y., Y. Hadar, and Y. Chen. 1993. Recycling of cattle manure: the composting process and characterization of maturity. J. Environ. Qual. 22:857-863.

Keeney D.R., and D.W. Nelson. 1982. Nitrogen-inorganic forms. In A.L. Page *et al.* (eds) "Methods of Soil Analysis" Part 2, 2nd edition. Agronomy 9:643-698. American Society of Agronomy, Madison, WI.

Morel, J.L., F. Colin, J.C. Germon, P. Godin, and C. Juste. 1985. Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost. In J.K.R. Gasser (ed) "Composting of Agricultural and other wastes" pp. 56-72. Elsevier Applied Science Publishers, London and New York.

Navarro, A.F., J. Cegarra, A. Roig, and D. Garcia. 1993. Relationships between organic

matter and carbon contents of organic wastes. Biore. Technol. 44:203-207.
N'Dayegamiye, A., and D. Isfan. 1991. Chemical and biological changes in compost of wood shavings, sawdust and seat moss. Can. J. Soil Sci. 71:475-484.

Ouatmane, A., M.R. Provenzano, M. Hafidi, and N. Senesi. 2000. Compost maturity assessment using calorimetry, spectroscopy and chemical analysis. Compost Sci. Utilization 8(2):124-134.

Roletto, E., R. Barberis, M. Consiglio, and R. Jodice. 1985. Chemical parameters for evaluating compost maturity. BioCycle 26(2):46-47.

Sanchez-Monedero, M.A., A. Roig, J. Martinez-Pardo, J. Cegarra, and C. Paredes. 1996. A microanalysis method for determining total organic carbon in extracts of humic substances. Relationships between total organic carbon and oxidable carbon. Biores. Technol. 57:291-295.

Schnitzer, M. 1982. Organic matter characterization. In A.L. Page *et al.* (eds) "Methods of Soil Analysis" Part 2, 2nd edition. Agronomy 9:581-594. American Society of Agronomy, Madison, WI.

Walkley, A., and I.A. Black. 1934. An examination of the Deytjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci. 37:29-38.

Willson, G.B., J.F. Parr, E. Epstin, P.B. Marsh, R.L. Chaney, D. Colacicco, W.D. Burge, L.J. Sikora, C.F. Tester, and S. Hornick. 1980. Manual for composting sewage sludge by the Beltville aerated-pile method. USEPA-600/8-80-002. USEPA, Cincinnati, OH.